

## Kajian Perbandingan Penggunaan Model Rangkaian Saraf Tiruan dan Model Penyesuaian Logik Kabur untuk Meramal Modulus Elastik Turapan Boleh Lentur (A Comparative Study of Artificial Neural Network and Adaptive System Network Model Neuro-Fuzzy Models to Predict Flexible Pavement Layer Moduli)

Mohammad Izzulhanif Mohd Arif<sup>a</sup>, Asmah Hamim<sup>a</sup>, Ahmad Nazrul Hakimi Ibrahim<sup>a</sup>, Faridah Hanim Khairuddin<sup>a,b</sup>,  
Nor Azlana Akmal Jamaludin<sup>c</sup> & Nur Izzi Md. Yusoff<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Smart and Sustainable Township Research Centre (SUTRA), Faculty of Engineering and Built Environment,  
Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor

<sup>b</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia,  
Kuala Lumpur

<sup>c</sup>Department of Computer Science, Faculty of Defence Science and Technology, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia,  
Kuala Lumpur

\*Corresponding author: izzzi@ukm.edu.my

Received 5 October 2018, Received in revised form 14 March 2019

Accepted 17 July 2019, Available online 31 October 2019

### ABSTRAK

Kajian ini telah dijalankan untuk menyiasat kesesuaian penggunaan dua model iaitu model rangkaian saraf tiruan (ANN) dan model penyesuaian logik kabur (ANFIS) untuk meramal modulus lapisan bagi turapan boleh lentur. Data meter pesongan berat jatuh (FWD) bagi Lebuhraya Butterworth-Kulim pada tahun 2013 telah digunakan dalam proses pengujian kedua-dua model ini. Model-model ANN dan ANFIS telah dilatih dan diuji secara berterusan menggunakan parameter yang berbeza sehingga output yang paling optimum diperolehi. Selepas itu, proses pengesahan telah dijalankan untuk menguji keupayaan model secara keseluruhan melalui penentuan nilai pekali penentuan ( $R^2$ ), ralat mutlak min (MAE), ralat kuasa dua min (MSE) dan ralat punca kuasa dua min (RMSE). Sebanyak 270 set data telah digunakan dalam pembangunan model ini. Berdasarkan proses analisis yang telah dijalankan, didapati bahawa kedua-dua model dapat meramal dengan baik modulus elastik bagi setiap lapisan turapan ( $R^2 > 0.90$ ). Walaubagaimanapun, perbandingan selanjutnya menunjukkan bahawa model ANFIS menghasilkan ketepatan yang tinggi berbanding model ANN, dengan nilai MAE, MSE, RMSE yang dihasilkan adalah rendah. Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa model-model rangkaian saraf mempunyai potensi yang baik untuk menggantikan model analitikal dan empirikal yang sedia ada dalam meramal modulus elastik bagi setiap lapisan turapan boleh lentur.

Kata kunci: Rangkaian saraf tiruan; Model penyesuaian logik kabur; Meter pesongan berat jatuh; Permodelan

### ABSTRAK

This research was conducted to investigate the suitability of using two models; namely the artificial neural network (ANN) and adaptive system network model Neuro-Fuzzy (ANFIS) methods to predict the flexible pavement layer moduli. The falling weight deflectometer (FWD) data obtained from the Butterworth-Kulim Expressway (BKE) in year 2011 were used to test the models. The ANN and ANFIS models have been trained and tested continuously using different parameters until the optimum output is obtained. Thereafter, a validation process has been carried out to test the ability of whole models by calculating the coefficient of determination ( $R^2$ ), the mean absolute error (MAE), the mean squared error (MSE) and root mean squared error (RMSE). A total of 270 data sets have been used to develop the models. Based on the analysis conducted, it was found that both models are able to predict well the flexible pavement layer moduli ( $R^2 > 0.90$ ). However, a further comparison suggested that the ANFIS model yield a higher precision compared to the ANN model, with lower MAE, MSE and RMSE values. Therefore, it can be inferred that the neural network models have an excellent potential to replace the existing analytical and empirical models in predicting the flexible pavement layer moduli.

Keywords: Artificial neural network; Adaptive system network model neuro-fuzzy; Falling weight deflectometer; Modelling

### PENGENALAN

Kebiasaanya nilai kekukuhan atau nilai modulus elastik bagi sesuatu turapan berasfalt ditentukan melalui ujikaji tanpa

musnah iaitu ujian meter pesongan berat jatuh (FWD). Dalam ujikaji ini, perkara yang paling penting adalah proses untuk menganalisis data yang diperolehi. Selepas data diperolehi, prosedur pengiraan semula (back-calculation) dilakukan

untuk mengira semula modulus elastik bagi turapan jalan tersebut (Saltan et al. 2002). Prosedur pengiraan semula melibatkan pengiraan pesongan bagi turapan berasfalt secara teori di bawah beban kenaan menggunakan modulus lapisan turapan yang diandaikan terlebih dahulu (Bredenhann & Van de Ven 2004). Modulus elastik perlu dikira kerana ia adalah satu parameter yang penting dalam pencirian prestasi campuran berasfalt.

Namun, terdapat kekurangan dalam menentukan nilai kekukuhan menggunakan kaedah tersebut. Hal ini kerana kaedah pengiraan semula untuk turapan berasfalt memakan masa yang lama dan kos yang tinggi. Melalui kaedah ini, data ketebalan dan nilai pesongan bagi turapan jalan tersebut diperlukan. Di samping itu kaedah yang digunakan juga rumit (Saltan et al. 2002). Selain itu, ujikaji yang dilakukan terutamanya ujikaji di makmal perlu dijalankan dengan peralatan dan mesin khas serta memerlukan tenaga mahir yang mempunyai pengetahuan untuk mengendalikan peralatan dan mesin tersebut (Zeghal 2008). Justeru itu, terdapat satu kaedah yang boleh digunakan untuk melakukan ramalan tersebut iaitu dengan menggunakan rangkaian saraf tiruan (ANN) dan model penyesuaian logik kabur. Sistem ramalan jenis ini tidak bergantung kepada persamaan matematik untuk menerangkan tentang hasil keputusan ujikaji. Ia hanya bergantung kepada keupayaan pembelajaran setiap elemen dalam model tersebut untuk menyelesaikan masalah (Zeghal 2008). Pada masa kini, rangkaian jenis ini telah didapati menjadi alat pengkomputeran yang berkuasa tinggi dan serba boleh untuk menyusun dan menghubungkan maklumat dengan cara yang sudah terbukti berguna untuk menyelesaikan masalah yang terlalu kompleks dan sukar difahami (Abo-Hashema 2009).

Penggunaan model ANN juga telah diaplikasikan di dalam bidang kejuruteraan jalan raya (Thube 2012; Singh et al. 2013; Shafabakhsh et al. 2015; Liu et al. 2018). Pada 2004, Bredenhann (2004) telah menggunakan model ANN untuk proses pengiraan balik nilai modulus turapan jalan melalui pengukuran pesongan turapan tersebut. Dalam kajian ini telah terbukti bahawa ANN berjaya dilatih untuk mengira balik modulus turapan daripada bentuk pesongan yang diukur. Zeghal (2008) menggunakan model ANN dalam menganggarkan nilai modulus dinamik bagi pelbagai campuran berasfalt yang mempunyai kandungan lompong udara, penggredan dan pengikat yang berbeza. Keputusan kajian membuktikan bahawa model ANN boleh digunakan untuk menganggarkan nilai modulus dinamik campuran berasfalt. Pada tahun yang sama juga Abo-hashema (2008) telah menggunakan model ANN untuk merekabentuk lapisan untuk turapan boleh lentur. Keputusan menunjukkan bahawa model ANN boleh digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan turapan dengan ketepatan yang tinggi. Ceylan et al. (2009) telah membina model ANN bagi meramal nilai modulus elastik untuk campuran berasfalt. Keputusan menunjukkan nilai modulus elastik yang diramal menggunakan model tersebut adalah lebih tepat jika dibandingkan dengan model regresi yang sedia ada. Model ANN telah dibina oleh Martinez dan Angelone (2009) bagi meramal nilai modulus

dinamik campuran berasfalt di Argentina. Keputusan ujikaji ini menunjukkan bahawa nilai modulus dinamik yang diramal menggunakan model ANN ini adalah lebih tepat jika dibandingkan dengan model regresi sedia ada dan lebih mudah untuk digabungkan dengan model daripada Panduan Reka Bentuk Turapan Mekanistik-Empirikal (ME-PDG).

Selain itu, Hamim et al. (2013) telah menggunakan dua jenis model ANN dalam meramal cirian reologi campuran berasfalt iaitu rangkaian suap depan pelbagai lapisan dan rangkaian fungsi asas jejarian. Hasil daripada analisis yang dijalankan didapati kedua-dua model mampu untuk meramal sifat reologi campuran berasfalt dengan sangat baik dan model ini berpotensi untuk menggantikan model-model analitikal dan empirikal yang telah dibangunkan dalam kajian-kajian lepas untuk meramal kekukuhan sesuatu campuran berasfalt. Shafabakhsh et al. (2015) telah membina model ANN untuk memodelkan terikan akhir campuran asphalt yang mempunyai parameter-parameter seperti jenis agregat, jenis bahan tambah, kandungan bahan tambah, suhu dan tegasan yang berbeza. Didapati bahawa model ANN yang mempunyai 10 neuron di dalam lapisan tersembunyi memberikan ramalan yang baik di antara data kajian dan data permodelan. Terbaru, Liu et al. (2018) telah membangunkan model ANN untuk meramalkan nilai modulus dinamik campuran asphalt yang mengandungi batuan kerikil. Model ANN yang dibangunkan ini telah dibandingkan dengan model Iowa dan keputusan menunjukkan bahawa model ANN ini memberikan kejutuan ramalan yang lebih tinggi berbanding dengan model Iowa.

Daripada kajian-kajian kepustakaan yang lepas, dapat disimpulkan bahawa model ANN adalah sangat berguna dan boleh diaplikasikan di dalam kejuruteraan turapan jalan raya. Model ANN boleh diadaptasikan seperti dalam membuat penilaian ke atas turapan, mereka bentuk, meramal dan sebagainya. Oleh itu, kajian ini dilakukan untuk membangunkan model rangkaian saraf tiruan menggunakan dua jenis rangkaian yang berbeza iaitu model ANN dan model sistem penyesuaian logik kabur (ANFIS). Keputusan yang diperolehi daripada kedua-dua jenis model ini kemudiannya akan dibandingkan dengan keputusan ujian FWD.

#### KAEDAH KAJIAN

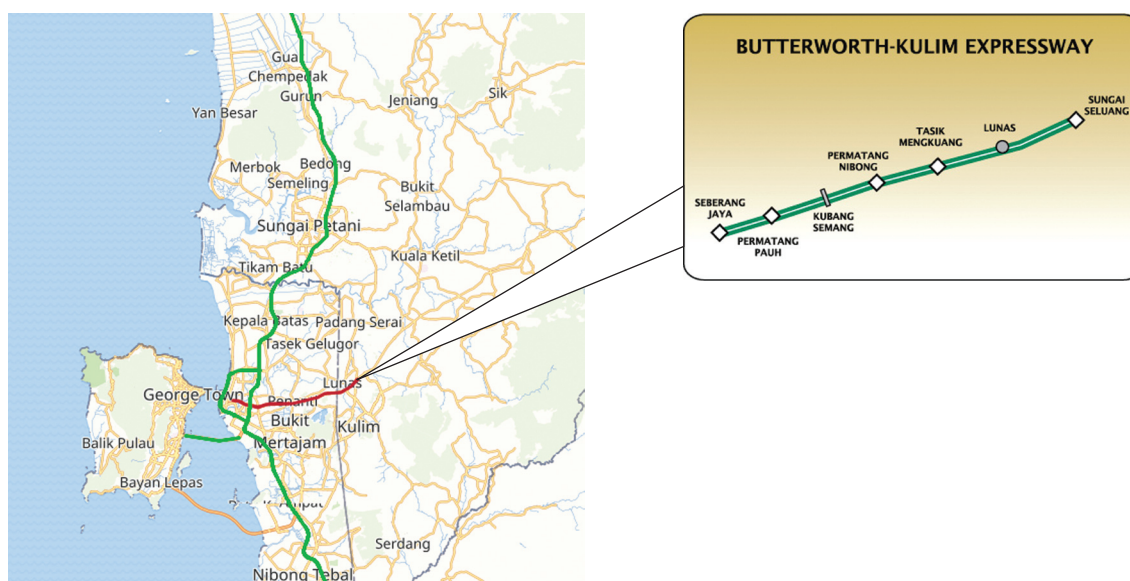
##### PENGUMPULAN DATA

Data-data yang digunakan dalam kajian ini adalah data yang diperolehi daripada penilaian keadaan turapan pada tahun 2013 sepanjang jajaran Lebuhraya Kulim-Butterworth seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Data ini diperolehi daripada ujikaji FWD yang dilakukan di lebuhraya tersebut. Selain daripada data ataupun parameter, keputusan hasil daripada pengiraan balik ujikaji FWD ini juga digunakan sebagai data sasaran untuk model ANN dan akan dibandingkan dengan data output yang diperolehi daripada pembangunan model ANN. Data input yang digunakan dalam proses penyediaan model saraf tiruan ini ialah data ketebalan lapisan turapan dan data pesongan daripada ujian FWD yang telah dijalankan di 270 lokasi sepanjang lebuhraya tersebut. Ujian FWD telah diulang

sebanyak 3 kali untuk setiap lokasi bagi mengambil bacaan pesongan 7 pengesan.

Berdasarkan kepada laporan ujikaji FWD, struktur turapan di lebuhraya tersebut terdiri daripada 4 lapisan iaitu lapisan permukaan, lapisan asas, lapisan sub-asas dan lapisan subged. Rajah 2 menunjukkan maklumat ketebalan setiap

lapisan turapan di lapangan. Lapisan permukaan mempunyai ketebalan antara 150-245 mm manakala lapisan asas dan sub-asas mempunyai ketebalan antara 107-650 mm dan 107-673 mm masing-masing dan ketebalan tidak terhitung untuk lapisan subged.



RAJAH 1. Jajaran Lebuhraya Kulim Butterworth (berwarna merah)

Lapisan permukaan	↕	150-245 mm
Lapisan asas	↕	107-650 mm
Lapisan sub-asas	↕	107-673 mm
Lapisan subged	↕	∞

RAJAH 2. Ketebalan lapisan turapan di Lebuhraya

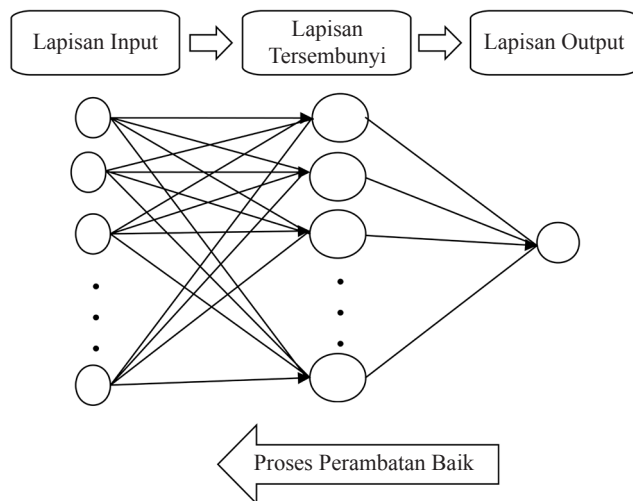
Sebanyak 170 set data akan digunakan untuk membangunkan model ANN dan ANFIS. Data tersebut akan dibahagikan kepada tiga bahagian iaitu 70% (189 data) untuk proses melatih model. Manakala sebanyak 15% (41 data) pula digunakan untuk proses pengesahan model dan 15% (40 data) digunakan untuk proses pengujian model. Pembahagian data tersebut dilakukan secara rawak.

#### PENYEDIAAN MODEL ANN DAN ANFIS

Dalam penyediaan model ANN, proses-proses yang terlibat adalah penentuan bilangan lapisan tersembunyi, bilangan neuron dalam setiap lapisan tersembunyi serta penentuan fungsi pemindahan yang akan digunakan. Bagi model ANFIS pula, proses yang terlibat adalah penentuan bilangan aturan asas dan penentuan fungsi pemindahan pada setiap lapisan

model. Dalam Matlab R2009b, model ANN dan ANFIS telah direkabentuk dalam bentuk *graphical user interface* (GUI). GUI ini yang akan digunakan dalam proses penyediaan model. Di dalam perisian Matlab, model ANN sudah direkabentuk dan cara untuk menggunakan model ini adalah dengan menaip fungsi 'nftool.' Data input dan data sasaran perlulah dimuatnaik dan dipanggil terlebih dahulu.

Rajah 3 menunjukkan struktur rangkaian model ANN yang telah direka bentuk. Berdasarkan kepada Rajah 3 tersebut, terdapat 3 lapisan asas dalam pembangunan model ANN iaitu lapisan input, lapisan tersembunyi dan lapisan output. Proses perambatan balik digunakan dalam proses melatih model bagi meminimalkan ralat antara data sasaran dan data output yang diperolehi. Jadual 1 pula menunjukkan bilangan neuron dan fungsi pemindahan yang digunakan dalam model ANN. Berdasarkan Jadual 3 tersebut, bilangan



RAJAH 3. Struktur rangkaian model ANN

JADUAL 1. Struktur rangkaian dan fungsi pemindahan model ANN

Perkara	Bilangan Neuron	Fungsi Pemindahan
Lapisan Input	10	-
Lapisan Tersembunyi	20	Sigmoid
Lapisan Output	1	Linear

10 neuron bagi lapisan input mewakili jumlah data input manakala satu neuron bagi lapisan output mewakili data output atau keputusan bagi model ANN. Bilangan neuron dalam lapisan tersembunyi akan ditentukan dengan kaedah cuba jaya bagi menghasilkan keputusan yang paling optimum iaitu nilai modulus elastik yang dihasilkan oleh model ini mempunyai ketepatan yang tinggi jika dibandingkan dengan nilai modulus elastik yang sebenar. Manakala, Jadual 2 pula menunjukkan secara terperinci mengenai fungsi pemindahan yang digunakan dalam pembangunan model ANN.

JADUAL 2. Fungsi pemindahan (Hamim et al. 2009)

Nama	Hubungan input/output	Ikon	Fungsi Matlab
Linear	$a = n$		purelin
Log-Sigmoid	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		logsig

Sama seperti model ANN, model ANFIS juga sudah direkabentuk di dalam perisian Matlab. Cara untuk menggunakan model ini adalah dengan menaip fungsi 'anfisedit.' Data input dan data sasaran juga perlulah dimuatnaik dan dipanggil terlebih dahulu. Dalam membangunkan pendekatan proses pengiraan semula bagi model ANFIS, input data yang dimuatnaik akan dibahagikan menggunakan 'subtractive clustering technique' dan fungsi keahlian yang digunakan bagi data input adalah fungsi *Gaussian*. Seterusnya pemilihan sistem inferens bagi fungsi output iaitu menggunakan fungsi Sugeno. Struktur model ANFIS akan sempurna dengan memilih algoritma pembelajaran secara hibrid dan menggunakan skim pembelajaran secara kumpulan.

#### LATIHAN DAN UJI MODEL

Model bagi kedua-dua rangkaian saraf akan dilatih terlebih dahulu. Daripada 270 data, sebanyak 70% daripada data tersebut akan terlibat dalam proses latihan yang dinamakan set latihan. Set latihan ini akan dilatih dengan menggunakan algoritma-algoritma latihan tertentu sehingga mencapai ralat yang paling minimum di mana matlamat ralat yang telah ditetapkan bagi setiap model adalah 0.00001. Seterusnya ujian akan dilakukan kepada 15% lagi data daripada data yang diperolehi. Ujian adalah berpandukan kepada model yang dibangunkan dalam fasa latihan. Proses latihan dan ujian akan dilakukan berulang kali dengan mengubah parameter-

parameter yang terlibat seperti jumlah neuron dan jenis fungsi yang digunakan sehingga analisis yang dijalankan mengeluarkan output yang paling optimum dengan nilai ralat yang memenuhi kriteria yang telah ditetapkan.

Bagi model ANN, algoritma yang akan digunakan adalah *Levenberg-Marquardt* untuk algoritma perambatan balik bagi mengurangkan ralat antara keputusan daripada model ANN dan data sebenar. Algoritma *Levenberg-Marquardt* ini dipilih dalam kajian ini kerana ia lebih kuat dan lebih cepat menumpu daripada algoritma *gradient descent* konvensional yang lain (Alp & Cigizoglu 2007; Sahoo et al. 2009; Tasdemir 2009). Ramai para penyelidik seperti Tarefder et al. (2005), Ceylan et al. (2009), Tasdemir (2009) dan lain-lain telah menggunakan algoritma *Levenberg-Marquardt* untuk melatih model ANN. Manakala bagi model ANFIS pula fungsi yang akan digunakan adalah fungsi *Gaussian*. Dalam proses latihan dan uji, pembahagian data sama ada terlibat dalam proses latihan atau pun dalam proses ujian adalah secara rawak. Pengiraan ralat, E yang akan digunakan adalah mengikut Persamaan (1):

$$\left( E = \frac{x - y}{y} \times 100 \right) \quad (1)$$

di mana  $x$  adalah nilai ramalan (keputusan daripada model yang dibangunkan) dan  $y$  adalah nilai sebenar (keputusan uji kaji).



## PENGESAHAN MODEL

Proses pengesahan model akan dilakukan selepas output yang optimum diperoleh daripada proses latihan dan ujian. Pengesahan perlu dilakukan untuk mengetahui ketepatan model yang dibangunkan secara keseluruhannya. Dalam kajian ini, pekali penentuan ( $R^2$ ) akan digunakan untuk menilai ketepatan model ANN dan model ANFIS yang dibangunkan. Manakala, ralat min mutlak (MAE), ralat kuasa dua min (MSE) dan ralat punca kuasa dua min (RMSE) akan digunakan untuk menentukan model yang lebih tepat dalam meramal modulus elastik turapan jalan.

1.  $R^2$  adalah panduan yang digunakan untuk mengukur ketepatan model yang dibangunkan. Melalui cara ini, ketepatan diungkapkan dengan nilai 0 hingga 1 di mana nilai satu menunjukkan output model yang dibangunkan adalah sangat tepat dengan nilai yang diperolehi melalui ujikaji yang dijalankan di makmal. Pengiraan  $R^2$  adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Persamaan (2).

$$\left( R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{\sum_{i=1}^n (x - z)^2} \right) \quad (2)$$

2. MAE, seperti yang ditunjukkan di dalam Persamaan (3), ialah magnitud purata ralat dalam data ramalan tanpa mengambil kira arah mereka.

$$\left( MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x - y| \right) \quad (3)$$

3. MSE ialah purata kuasa dua ralat antara data sebenar dan data ramalan. Persamaan (4) menunjukkan formula pengiraan MSE yang akan digunakan.

$$\left( MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2 \right) \quad (4)$$

4. RMSE ialah punca kuasa dua kepada purata kuasa dua semua ralat. Formula yang akan digunakan untuk pengiraan RMSE adalah seperti Persamaan (5).

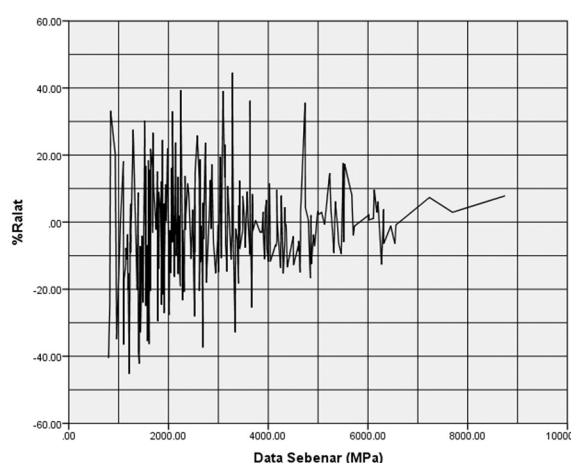
$$\left( RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{n}} \right) \quad (5)$$

di mana  $x$  adalah nilai data ramalan (keputusan daripada model yang dibangunkan),  $y$  adalah nilai data sebenar (keputusan ujikaji),  $z$  adalah nilai purata nilai-nilai sebenar dan  $n$  adalah bilangan data yang digunakan.

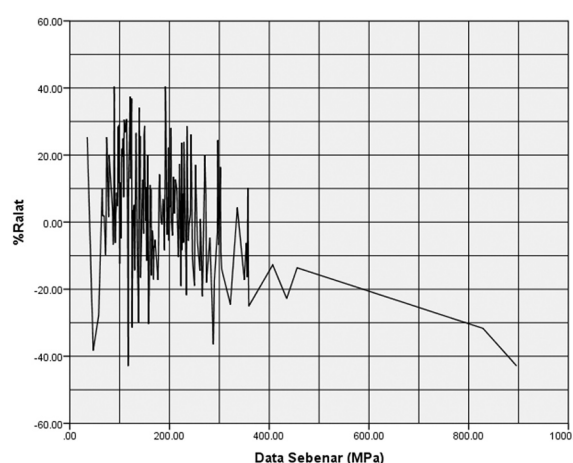
## KEPUTUSAN

## MODEL ANN

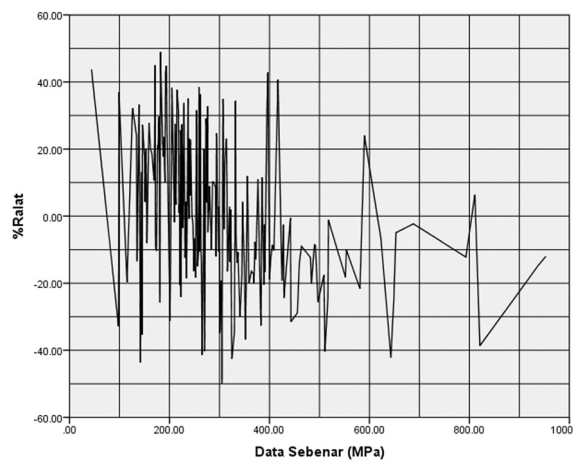
Satu model ANN digunakan untuk meramal nilai modulus elastik bagi turapan boleh lentur Lebuhraya Butterworth-Kulim. Berdasarkan kepada keputusan yang diperolehi daripada model ini, struktur rangkaian yang terbaik untuk meramal nilai modulus elastik bagi turapan jalan tersebut adalah 10-20-1. Rajah 4(a-d) menunjukkan peratusan ralat untuk setiap lapisan turapan boleh lentur semasa proses pengujian dijalankan dalam meramal nilai modulus elastik bagi model ANN. Secara umumnya, peratus ralat maksimum semasa proses pengujian dilakukan terhadap data sasaran bagi keempat-empat lapisan turapan adalah dalam lingkungan 50% dan -50%. Rajah 4(b) merupakan graf peratus ralat terbaik yang diperolehi daripada proses latihan dan ujian yang telah dilakukan oleh model ANN tersebut iaitu pada lapisan asas dengan peratusan ralat tidak melebihi 40% dan -43%.



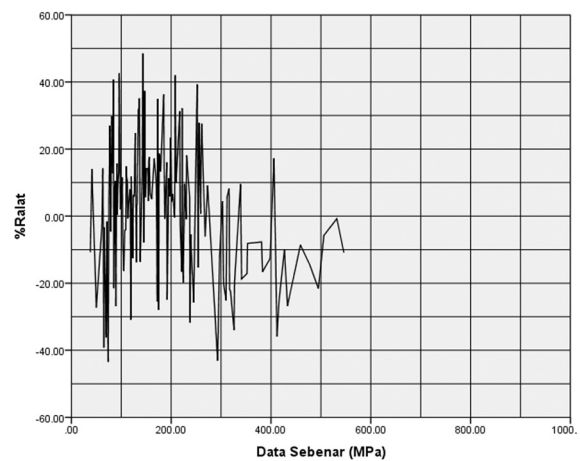
(a) Lapisan Permukaan



(b) Lapisan Asas



(c) Lapisan Sub-asas



(d) Lapisan Subgred

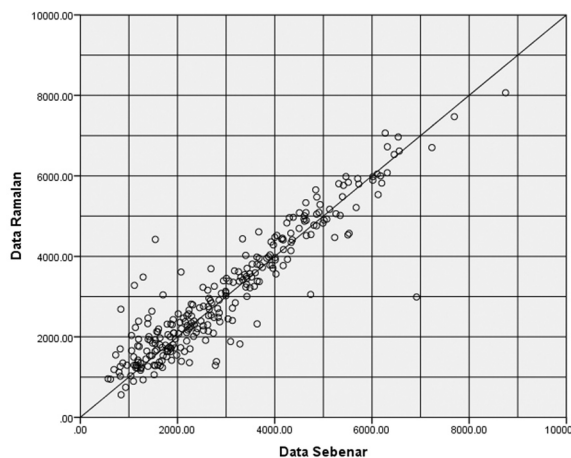
RAJAH 4. Graf peratus ralat melawan data sebenar untuk meramal nilai modulus elastik bagi model ANN untuk (a) lapisan permukaan, (b) lapisan asas, (c) lapisan sub-asas dan (d) lapisan subgred

Rajah 5(a-d) pula menunjukkan graf perkadaran antara data ramalan yang diperolehi daripada model ANN dengan data sebenar yang diperolehi daripada keputusan ujikaji FWD untuk nilai modulus elastik bagi setiap lapisan turapan. Manakala Jadual 3 pula menunjukkan ringkasan keputusan analisis statistik bagi model ANN.

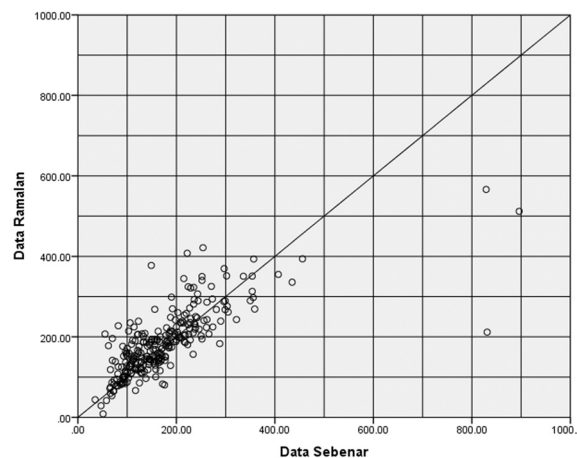
Titik-titik yang berselerak dalam Rajah 5(a-d) tersebut menunjukkan perkadaran antara nilai modulus elastik bagi data ramalan yang diperolehi daripada model yang telah dibina dan data sebenar. Garis lurus pula menunjukkan persamaan garis sepadan antara data ramalan dengan data sebenar.

Daripada Jadual 3, didapati bahawa ramalan nilai modulus elastik bagi turapan lebuh raya ini mempunyai

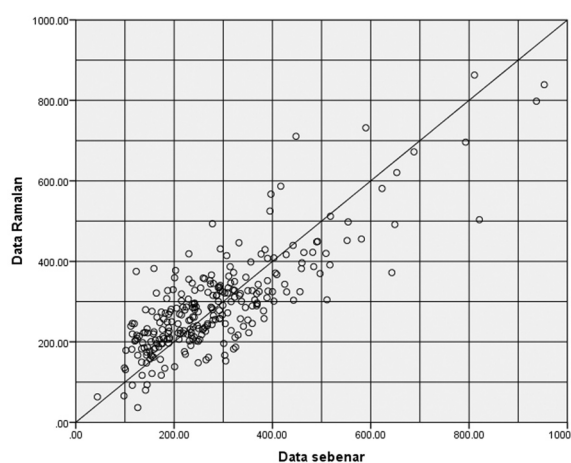
ketepatan yang tinggi dengan nilai pekali penentuan,  $R^2$  menghampiri nilai 1 iaitu bagi lapisan permukaan adalah 0.92, bagi lapisan asas adalah 0.83, bagi lapisan sub-asas adalah 0.85 dan bagi lapisan subgred adalah 0.83. Nilai ralat MAE digunakan untuk mengira purata ralat antara data sebenar dan data ramalan. Nilai MAE yang diperolehi daripada proses pengiraan ialah 87.84 MPa, 9.66 MPa, 7.50 MPa dan 2.77 MPa bagi setiap lapisan turapan. Nilai MAE yang kecil menunjukkan bahawa struktur model rangkaian saraf tiruan direkabentuk dengan baik dengan ketepatan yang tinggi. Nilai RMSE adalah berpanduan kepada nilai MSE. Nilai RMSE digunakan untuk mengukur ketepatan model. Melalui proses analisis ini, nilai RMSE yang diperolehi adalah 594.91 MPa, 68.42 MPa, 82.18 MPa dan 54.76 MPa.



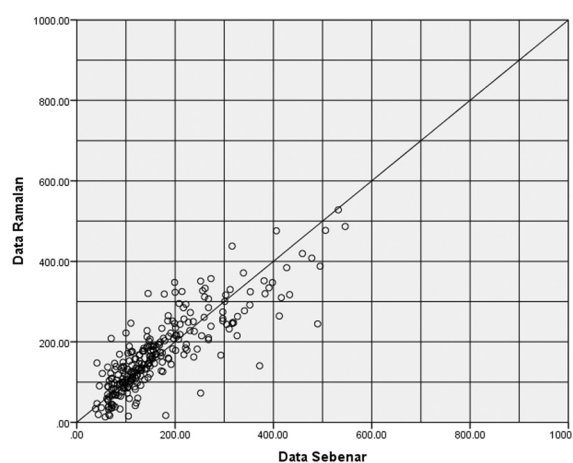
(a) Lapisan Permukaan



(b) Lapisan Asas



(c) Lapisan Sub-Asas



(d) Lapisan Subgred

RAJAH 5. Graf data ramalan melawan data sebenar bagi model ANN untuk (a) lapisan permukaan, (b) lapisan asas, (c) lapisan sub-asas dan (d) lapisan subgred

JADUAL 3. Analisis statistik untuk model ANN

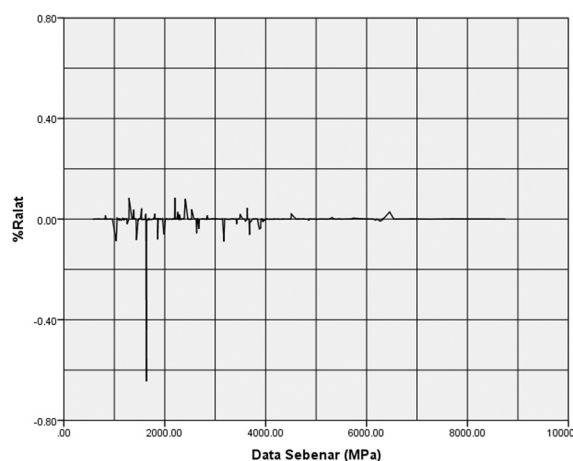
Lapisan	R2	MAE	MSE	RMSE
Permukaan	0.92	87.84	353912.57	594.91
Asas	0.83	9.66	4680.92	68.42
Sub-Asas	0.83	7.50	6753.88	82.18
Subgred	0.85	2.77	2998.70	54.76

MODEL ANFIS

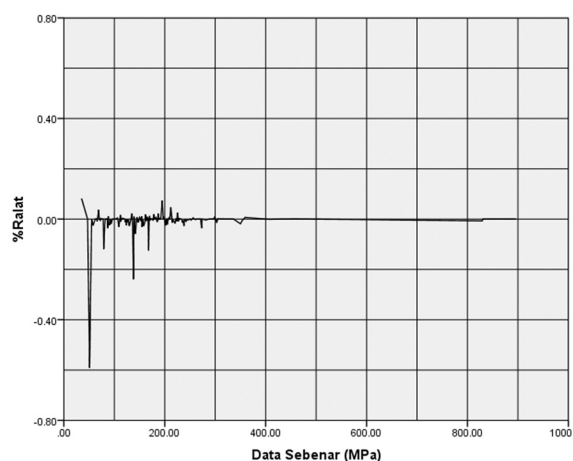
Rajah 6(a-d) menunjukkan peratusan ralat semasa ujian menggunakan model ANFIS bagi meramal modulus elastik bagi turapan Lebuhraya Butterworth-Kulim. Daripada rajah-

rajah tersebut, didapati bahawa peratusan ralat maksimum semasa ujian dilakukan terhadap data sebenar bagi setiap lapisan menggunakan model ANFIS adalah dalam lingkungan -0.65% dan 0.12%. Rajah 6(c) iaitu graf peratusan ralat bagi lapisan sub-asas merupakan graf peratusan ralat yang terbaik yang diperolehi daripada proses latihan dan ujian yang telah dilakukan oleh model ANFIS tersebut iaitu dengan peratusan ralat tidak melebihi -0.03% dan 0.085%.

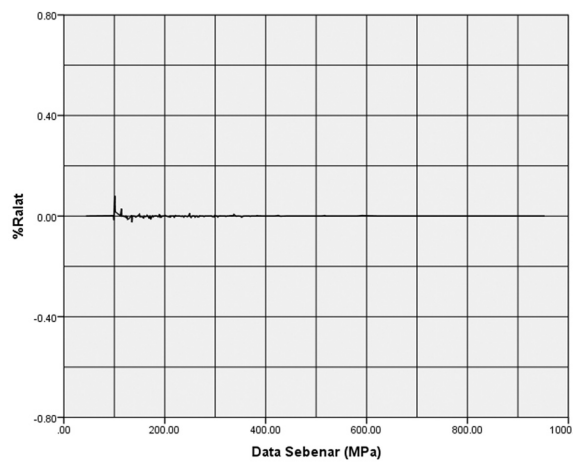
Rajah 7(a-d) pula menunjukkan graf perkadaran antara data ramalan yang diperolehi daripada model ANFIS dengan data sebenar iaitu data modulus elastik daripada ujikaji FWD Lebuhraya Butterworth-Kulim. Manakala Jadual 4 pula menunjukkan ringkasan keputusan analisis statistik bagi model ANFIS.



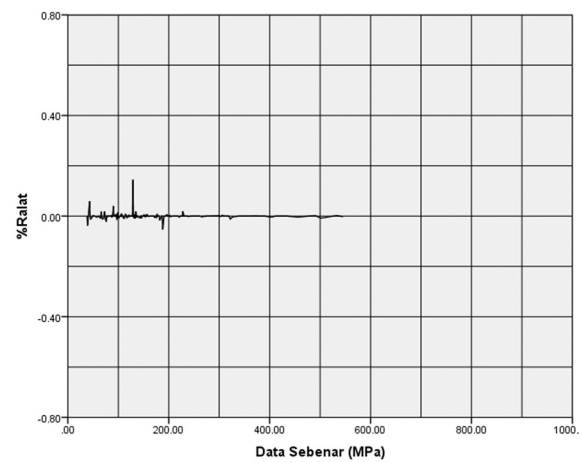
(a) Lapisan Permukaan



(b) Lapisan Asas

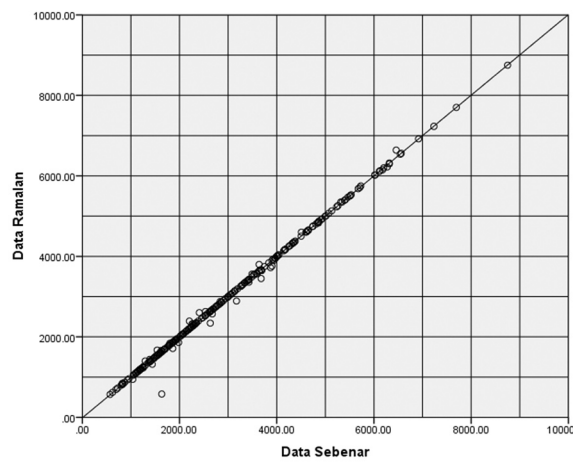


(c) Lapisan Sub-Asas

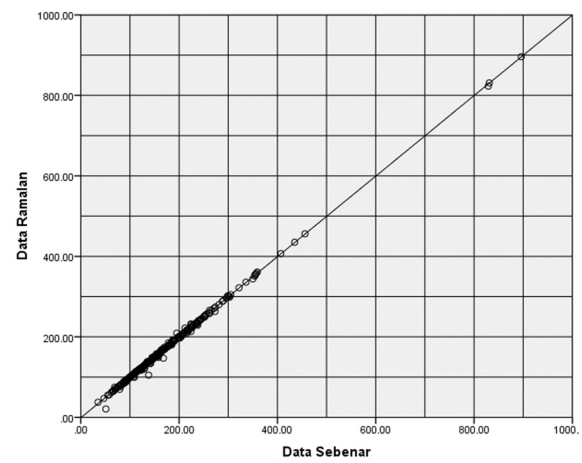


(d) Lapisan Subged

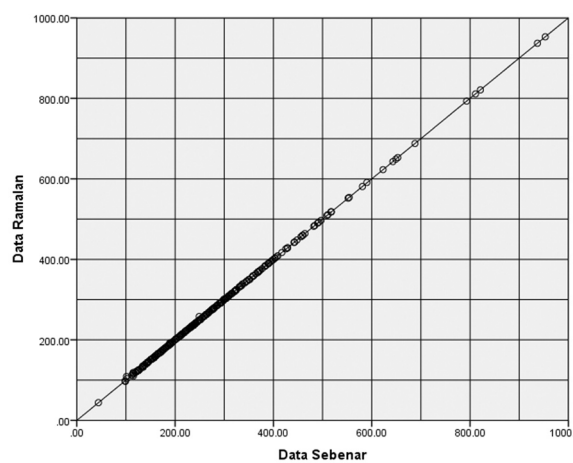
RAJAH 6. Graf peratusan ralat melawan data sebenar untuk meramal nilai modulus elastik bagi (a) lapisan permukaan, (b) lapisan asas, (c) lapisan sub-asas dan (d) lapisan subged



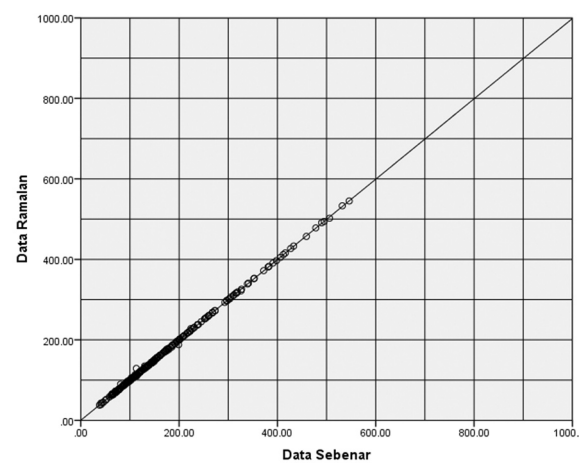
(a) Lapisan Permukaan



(b) Lapisan Asas



(c) Lapisan Sub-Asas



(d) Lapisan Subged

RAJAH 4. Graf data ramalan melawan data sebenar model ANFIS bagi (a) lapisan permukaan, (b) lapisan asas, (c) lapisan sub-asas dan (d) lapisan subged



JADUAL 4. Analisis statistik untuk model ANFIS

Lapisan	R <sup>2</sup>	MAE	MSE	RMSE
Permukaan	0.99	5.86	6141.01	78.37
Asas	0.99	0.81	16.91	4.11
Sub-Asas	1.00	0.09	1.64	1.28
Subgred	1.00	0.09	2.75	1.66

## PERBINCANGAN

Melalui rajah-rajah peratusan ralat bagi setiap lapisan turapan menggunakan kedua-dua model ANN dan ANFIS menunjukkan bahawa model yang dibangunkan boleh memberikan keputusan yang baik dalam meramal modulus elastik bagi turapan tersebut. Secara keseluruhannya peratus ralat yang diperolehi melalui proses latihan dan proses ujian adalah dalam lingkungan yang memuaskan iaitu dalam julat -40% hingga 40%. Majoriti data ramalan yang dihasilkan adalah di dalam lingkungan julat ralat yang dibenarkan walaupun terdapat beberapa data yang berada di luar julat. Keputusan ini boleh diterima kerana peratusan ralat tersebut hanya dijadikan panduan untuk melihat samada model yang dibangunkan memberikan keputusan yang terbaik atau tidak. Didapati bahawa peratusan ralat model ANFIS adalah lebih rendah jika dibandingkan dengan model ANN. Ini menunjukkan bahawa ketepatan ramalan menggunakan ANFIS adalah lebih baik berbanding model ANN.

Jadual 3 dan Jadual 4 telah menunjukkan bahawa kedua-dua model mampu untuk meramal modulus elastik bagi turapan Lebuhraya Butterworth-Kulim dengan baik. Akan tetapi ramalan dengan menggunakan model ANFIS adalah lebih tepat jika dibandingkan dengan model ANN. Ini dapat dilihat dengan nilai pekali penentu,  $R^2$  bagi model ANFIS sudah menghampiri nilai 1 iaitu 0.99 bagi lapisan permukaan dan lapisan asas manakala bagi lapisan sub-asas dan lapisan subgred adalah 1. Ini dibuktikan lagi dengan nilai MAE, MSE dan RMSE model ANFIS yang lebih rendah bagi setiap lapisan turapan. Secara kesimpulannya, ketepatan model ANFIS dalam meramal modulus elastik bagi turapan lebuhraya Butterworth-Kulim adalah lebih tinggi dibandingkan dengan model ANN.

Perbandingan juga telah dibuat di antara keputusan yang diperolehi daripada kajian ini dengan kajian-kajian lepas yang berkaitan dengan penggunaan rangkaian saraf dalam meramal nilai modulus elastik bagi turapan jalan. Antaranya adalah kajian oleh Gopalakrishnan dan Ceylan (2009) di mana kajian yang dilakukan adalah untuk meramal modulus elastik untuk turapan jalan di lapangan terbang menggunakan model ANFIS. Melalui kajian ini nilai  $R^2$  yang diperolehi berdasarkan proses latihan dan ujian menggunakan model ANFIS bagi lapisan subgred adalah 0.99 dan lapisan campuran permukaan adalah 0.99. Namun, keputusan yang diperolehi daripada kajian ini dengan menggunakan model ANFIS adalah lebih baik dengan nilai  $R^2$  bagi lapisan subgred dan lapisan sub-asas adalah 1. Hal ini kerana model ANFIS dalam kajian ini menggunakan

1024 aturan asas iaitu melebihi jumlah aturan asas model kajian lepas.

Selain itu, perbandingan juga dibuat dengan kajian oleh Göktepe et al. (2004). Kajian yang dijalankan adalah untuk meramal ciri mekanikal bagi turapan boleh lentur iaitu meramal modulus elastik bagi turapan anjal. Kajian ini menggunakan lima nilai pesongan turapan boleh lentur sebagai input dan tiga nilai modulus turapan sebagai output bagi proses melatih dan menguji model ANFIS. Didapati bahawa nilai-nilai  $R^2$  untuk lapisan asas dan subgred masing-masing adalah 0.80 dan 0.82. Berdasarkan keputusan ini, dapat disimpulkan bahawa ramalan yang dilakukan oleh kedua-dua model ANFIS dan ANN dalam kajian ini adalah lebih baik dibandingkan dengan nilai daripada kajian Göktepe et al. (2004) di mana nilai  $R^2$  untuk kajian ini menghampiri nilai 1 bagi lapisan subgred dan lapisan asas.

Di samping itu, perbandingan juga telah dibuat dengan kajian yang dilakukan oleh Hamim et al. (2009) mengenai ramalan cirian reologi campuran berasfalt menggunakan saraf tiruan. Kajian ini menggunakan dua jenis model ANN iaitu rangkaian saraf suap-depan pelbagai lapisan dan rangkaian fungsi asas jejarian untuk meramal nilai kompleks modulus dan nilai sudut fasa bagi turapan berasfalt. Keputusan  $R^2$  untuk nilai kompleks modulus bagi model rangkaian saraf suap-depan pelbagai lapisan dan model rangkaian fungsi asas jejarian masing-masing adalah 0.9947 dan 0.9953. Manakala keputusan  $R^2$  untuk nilai sudut fasa bagi model rangkaian saraf suap-depan pelbagai lapisan dan model rangkaian fungsi asas jejarian masing-masing adalah 0.9977 dan 0.9997. Dapat dilihat bahawa nilai model yang dibangunkan dalam kajian ini mempunyai ketepatan yang sangat tinggi kerana nilai  $R^2$  yang dihasilkan adalah sangat hampir dengan nilai 1. Namun, dalam kajian ini, nilai  $R^2$  yang diperolehi adalah rendah jika dibandingkan dengan nilai dalam Jadual 3 iaitu dalam julat 0.83-0.92. Hal ini kerana dalam ujikaji yang dijalankan oleh Hamim et al. (2009), model ANN dibangunkan secara manual iaitu menentukan sendiri bilangan lapisan tersembunyi yang akan digunakan, bilangan neuron-neuron yang terlibat dalam lapisan tersebut dan fungsi pemindahan yang akan digunakan adalah lebih banyak. Manakala, bagi ujikaji ini pula, model ANN yang digunakan adalah model yang sudah dibangunkan dalam perisian MATLAB R2009b di mana model tersebut sudah mempunyai bilangan lapisan tersembunyi yang tetap dan fungsi keahlian yang terhad.

Secara kesimpulan, kajian ini telah menguatkan lagi bukti bahawa model rangkaian saraf samada model ANN ataupun model ANFIS mampu untuk meramal nilai modulus elastik bagi turapan jalan dengan baik dan boleh dijadikan sebagai alternatif untuk meramal nilai modulus elastik ini.

## KESIMPULAN

Berdasarkan ramalan nilai modulus elastik menggunakan model ANN dan ANFIS yang telah dijalankan, kedua-dua model mempunyai ketepatan ramalan yang tinggi. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai pekali penentu bagi setiap

lapisan adalah menghampiri nilai 1 iaitu bagi model ANN adalah dalam lingkungan 0.83 hingga 0.92 manakala bagi model ANFIS nilai yang diperolehi adalah dalam lingkungan 0.99-1.00. Selain itu, perbandingan ketepatan antara kedua-dua model mendapati bahawa model ANFIS boleh meramal nilai modulus elastik turapan dengan lebih tepat berbanding model ANN. Ini dibuktikan melalui analisis statistik yang dijalankan terhadap kedua-dua buah model di mana nilai  $R^2$  bagi model ANFIS adalah lebih tinggi iaitu sudah mendekati nilai 1. Berdasarkan pengiraan nilai MAE, MSE dan RMSE bagi setiap lapisan turapan pula mendapati bahawa nilai yang diperolehi daripada model ANFIS adalah lebih kecil berbanding nilai dari model ANN bagi setiap lapisan turapan.

#### PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Pusat Penyelidikan Bandar Pintar dan Lestari di atas bantuan kewangan dan kemudahan di bawah Geran (DIP-2017-004).

#### RUJUKAN

- Abo-hashema, M. 2009. Artificial neural network approach for overlay design of flexible pavements. *The International Arab Journal of Information Technology* 6(2): 204-212.
- Alp, M. & Cigizoglu, H. K. 2007. Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data. *Environmental Modelling & Software* 22(1): 2-13.
- Bredenhann, S.J. 2000. Application of neural networks in pavement management. *Masters Thesis*. Stellenbosch University, South Africa.
- Bredenhann, S. J. & Ven, M. F. C. Van De. 2004. Back-calculation of flexible pavement layer moduli from deflection measurement. *Proceedings of 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, South Africa, 12-16 September.
- Ceylan, H., Gopalakrishnan, K. & Kim, S. 2009. Looking to the future: the next-generation hot mix asphalt dynamic modulus prediction models. *International Journal of Pavement Engineering* 10(5): 341-352.
- Göktepe, A. B. 2004. Comparison of multilayer perceptron and adaptive neuro-fuzzy system on backcalculating the mechanical properties of flexible pavements. *The Bulletin of the Istanbul Technical University* 54(3): 65-77.
- Gopalakrishnan, K. & Ceylan, H. 2009. Adaptive neuro-fuzzy inference system-based backcalculation approach to airport pavement structural analysis. *Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements* 193: 9-16.
- Hamim, A., Hardwiyono, S., El-shafie, A., Md. Yusoff, N.I. & Hainin, M.R. 2013. Ramalan cirian reologi campuran berasfalt menggunakan rangkaian saraf tiruan. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)* 1: 1-8.
- Liu, J., Yan, K., Liu, J. & Zhao, X. 2016. Predicting the dynamic modulus of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles using artificial neural networks. *Proc., International Conference on Transportation Infrastructure and Materials*, Xian, China.
- Liu, J., Yan, K., Liu, J. & Zhao, X. 2018. Using artificial neural networks to predict the dynamic modulus of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles. *Journal of Materials in Civil Engineering* 30(4): 04018051.
- Martinez, F. & Angelone, S. 2010. The estimation of the dynamic modulus of asphalt mixtures using artificial neural networks. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> international Conference on Asphalt Pavements*, Nagoya, Japan.
- Sahoo, G. B., Schladow, S. G. & Reuter, J. E. 2009. Forecasting stream water temperature using regression analysis, artificial neural network, and chaotic non-linear dynamic models. *Journal of Hydrology* 378(3-4): 325-342.
- Saltan, M., Tigdemir, M. & Karasahin, M. 2002. Artificial neural network application for flexible pavement thickness modeling. *Turkish Journal of Engineering, Environment and Science* 26: 243-248.
- Shafabakhsh, G.H., Ani, O.J. & Talebsafa, M. 2015. Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials* 85: 136-143.
- Singh, D., Zaman, M. & Commuri, S. 2013. Artificial neural network modeling for dynamic modulus of hot mix asphalt using aggregate shape properties. *Journal of Materials in Civil Engineering* 25: 54-62.
- Tarefder, R. A., White, L. & Zaman, M. 2005. Neural network model for asphalt concrete permeability. *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(1): 19-27.
- Tasdemir, Y. 2009. Artificial neural networks for predicting low temperature performances of modified asphalt mixtures. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* 16: 237-244.
- Thube, D. T. 2012. Artificial neural network (ANN) based pavement deterioration models for low volume roads in India. *International Journal of Pavement Research and Technology* 5(2): 115-120.
- Zeghal, M. 2008. Visco-elastic portrayal of bituminous materials: artificial neural network approach. *Proceedings of GeoCongress 2008*, 1-8.